

# 高桩码头基桩损伤检测技术研究与展望

周楠<sup>1</sup>, 苏静波<sup>1\*</sup>, 吴锋<sup>2</sup>, 朱瑞虎<sup>1</sup>, 尹璐<sup>1</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200030)

**摘要:** 高桩码头基桩的损伤检测技术对于高桩码头的安全长期使用具有十分关键的作用, 对基桩损伤的位置、程度的识别与判定有利于及时对高桩码头结构进行修复与加固。基桩损伤的检测方法多种多样, 文中首先简要介绍了传统的基桩检测方法及其局限性, 而后阐述了基于动力的基桩损伤检测方法及其发展, 最后对高桩码头基桩损伤检测技术进行了总结和展望。

**关键词:** 高桩码头; 基桩; 损伤检测; 动力

中图分类号: U656.113 文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2017)08-0019-04

doi: 10.7640/zggwjs201708005

## Research and prospects of damage detection technology of high-piled wharf piles

ZHOU Nan<sup>1</sup>, SU Jing-bo<sup>1\*</sup>, WU Feng<sup>2</sup>, ZHU Rui-hu<sup>1</sup>, YIN Lu<sup>1</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. CCCC Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200030, China )

**Abstract:** Damage detection technologies of high-piled wharf piles play an important role in the safe and long-term use progress. To identify and judge the location and degree of pile damage is beneficial for people to repair and reinforce high-piled wharf structures timely. Damage testing technologies of high-piled wharf piles are varied. In this paper, we briefly introduced the traditional pile foundation inspection methods and their limitations at first, and then clarified the methods based on dynamic damage detection and their development. Finally, the damage detection technologies of high-piled wharf piles are summarized and proposed.

**Key words:** high-piled wharf; foundation piles; damage detection; dynamic

## 0 引言

我国港口工程领域中老旧高桩码头大量存在, 由于船舶撞击、岸坡变形、强风强震等因素的影响, 这些老码头普遍存在着损伤破坏的问题。作为码头上部的主要受力构件, 基桩对码头的安全长期使用起着关键性的作用。因此要想确保高桩码头结构的整体承载能力, 必须提高基桩损伤检测技术的有效性和检测结果的可靠性。由于码头

基桩自身的复杂性和不确定性, 以及损伤的高度隐蔽性, 急需采用有效手段对损伤进行检测, 本文将对目前高桩码头基桩损伤检测技术现状进行综述与展望。

### 1 传统基桩检测方法及其局限性

#### 1.1 静载法

静载法是指将静止荷载作用于待测构件的指定位置, 建立静力平衡方程, 根据实测结果得到构件刚度、静位移、静应变等参数来判别该构件的损伤。静载法测试时间长, 测试效率低, 测试费用高, 设备笨重, 且会对构件造成一定损伤, 因此静载法在实际工程应用中有一定局限性, 对于上部有梁板结构的高桩码头基桩检测难以实施。

收稿日期: 2017-02-19 修回日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51679081)

作者简介: 周楠 (1996—), 女, 江苏盐城人, 从事高桩码头结构性能检测与评估方面工作。

\*通讯作者: 苏静波, E-mail: jbsu@hhu.edu.cn

## 1.2 钻孔取芯法

钻孔取芯法通过检测桩长、桩身混凝土强度、桩底沉渣厚度、桩底持力层情况以及岩土特性等，来判断基桩桩身是否损伤，可直观可靠地反映基桩桩身的完整性。钻孔取芯法需在桩身钻孔取样进行压力检测，受取样面积的影响，无法有效全面地检测基桩局部缺陷和水平裂缝，存在一定的盲区，故只适用于损伤面积较大的基桩检测。而且，钻孔取芯法所需的成本较高，会对结构造成损伤，在工程应用中受到较大的限制。

## 1.3 超声波法

超声波法将声测管预埋在桩的两侧，分别发射和接收超声波。由于基桩混凝土厚度可以通过量测得到，再根据实测的超声波传播时间，便可计算出超声波在混凝土中的传播速度，由基桩的波速、波幅以及波形的变化情况可判断基桩的损伤情况，分析缺陷的位置及大小。混凝土密实程度越高，超声波传播速度越大；相反，密实程度越低，或混凝土存在孔洞缺陷等，超声波传播速度越小，由此可判断基桩损伤情况。超声波法不受基桩桩身尺寸限制，可通过采用密测、扫测等方法减少检测盲区。但是，超声波法须预埋声测管，成本高，操作繁琐，对缺陷难以进行定量分析，故难以大量使用，该方法主要适用于灌注桩的检测。

## 1.4 应力反射波法

应力反射波法是一种实用、经济、便捷的基桩无损检测方法，目前广泛应用于基桩损伤的判断和识别。

### 1.4.1 高应变反射波法

高应变反射波法假定基桩是一维的线弹性杆体，通过测量基桩桩顶因外界激振作用产生的应力波来判定基桩桩身是否损伤。

高应变反射波法仪器设备轻便，检测速度快，费用低，不仅可以检测桩身的结构完整性，还可分析沉桩能力，区分沉降是土的变形还是桩身结构破坏引起的。柴华友等<sup>[1]</sup>通过平台模型桩及护坡桩实验发现应力波在平台-桩系统中传播情况复杂，根据平台实测波形特征很难判断平台下基桩完整性。而由于高应变反射波法冲击能量大，且冲击力持续时间较长，各种应力波发生重叠，帽、梁、面板等上部结构的影响更为显著，这对基桩桩身上部的损伤识别是不利的。

### 1.4.2 低应变反射波法

低应变反射波法采用低能量激振作用，使待测基桩在线弹性范围内作低幅振动，测得桩顶速度，然后通过波动理论或频域处理数据技术理论进行分析，来判定桩身是否损伤。

低应变反射波法仪器设备便携，检测效率高，成本低，且理论模型成熟，被广泛应用于基桩损伤检测中。但是，由于受激振能量、桩周土约束、传感器等因素的影响，应力波在反射过程中能量急速衰减，因此该法受到基桩桩长的限制，无法对深部缺陷进行有效检测。不仅如此，对于多缺陷桩，低应变反射波法一般只能测到由桩顶向下的第一处缺陷，无法有效检测渐变缺陷的类型。

低应变反射波法又分为低应变纵波检测和低应变扭转波检测。季勇志等<sup>[2]</sup>运用 LS-DYNA 显式分析方法对这两种方法分别进行了数值模拟，通过对比发现，扭转波检测可有效避开基桩上部结构的干扰，缺陷灵敏度更高，但是扭转波较纵波衰减快，且加载产生纯扭矩较难实现。

## 2 基于动力的基桩损伤检测的方法和发展

### 2.1 时域分析和频域分析

时域分析以时间为基本计量单位，考察在特定时间段结构在荷载作用下的响应，确定结构参数。时域分析法采用原始实验数据，采集到的信号无需转换，也不受任何变换函数的假定条件限制。但是，时域分析中易采集到误差较大的信号，以致特征信号难以识别，且计算量巨大。

频域分析通过对时域信号的变换和提取获得结构的模态参数，其信号图谱容易取得，但缺点是频域分析法需对采集的时域信号进行离散傅里叶变换，变换过程将不可避免地带来一定的误差。

### 2.2 动力指纹法

动力指纹法是寻找与结构动力特性相关的动力指纹，通过动力指纹的变化判断结构的真实状况，常用的动力指纹包括：频率、振型、曲率模态、柔度差阵、模态应变能等。

### 2.2.1 频率指纹法

频率指纹方法通过实测固有频率确定结构损伤。1975年，Cawley 和 Adams<sup>[3]</sup>最早将固有频率作为损伤指标，用以检测纤维复合材料中的裂纹，之后也在悬臂梁、钢桁架及板结构的损伤识别中予以应用。该法测试精度较高、实测固有频率比较容易得到，且频率与测点位置无关；但对于具

有相同频率的对称位置的损伤, 检测较为困难。而且大量试验表明, 固有频率的变化对结构损伤的敏感性较低, 对大型的土木工程结构更不明显, 且无法定位损伤。

### 2.2.2 曲率模态指纹法

曲率模态本质上是一种应变模态, 结构破损时, 破损处刚度降低, 振型曲率增大。1991年, Pandy等<sup>[4]</sup>通过悬臂梁和简支梁验证分析, 发现模态振型曲率的变化对结构损伤很敏感, 故可根据振型曲率的变化分析损伤位置。然而, Ho 和 Ewins<sup>[5]</sup>的研究却发现振型曲率的测量误差会在中心差分法过程中被放大, 这就使得损伤识别结果的可靠性降低。因此采用该法需布置足够多的测点, 且测点位置要足够接近, 才能避免曲率模态振型产生较大误差。

### 2.2.3 柔度差阵法

柔度差阵法是一种基于模态分析的损伤识别方法, 该方法只需要测量基桩的几个低阶模态参数和频率就可判定损伤位置, 这是因为在模态满足归一化的前提下, 柔度矩阵是频率的倒数和振型的函数, 随着频率的增大, 可忽略柔度矩阵中高频率的倒数的影响, 这就避免了由于高阶模态的难以测量产生的误差。RaghaVendraChar 和 Aktan<sup>[6]</sup>通过对一个三跨混凝土桥梁进行数值分析和研究, 发现了相较于固有频率或振型, 模态柔度对构件的局部损伤更加灵敏。Pandey 和 Biswas<sup>[7]</sup>提出将柔度的改变量作为损伤识别因子, 研究结果亦表明模态柔度具有更高的损伤灵敏度, 且仅利用前几个低阶模态参数便可识别损伤位置。杨华<sup>[8]</sup>通过对悬臂梁在损伤情况下的数值模拟也验证了利用柔度矩阵进行损伤定位这种方法的有效性。由于损伤前后模态可能会发生跃迁, 导致同一阶次的模态在损伤前后并不是一一对应的关系, 这将会造成损伤识别的不准确。

### 2.2.4 模态应变能法

模态应变能法将损伤前后单元应变能的变化作为损伤因子来识别损伤。1988年, Chen<sup>[9]</sup>最早提出模态应变能这一概念, 通过计算模态应变能来识别损伤单元。Stubbs 等<sup>[10]</sup>利用两个结构自由度的模态应变能之差来识别一维梁存在的损伤。Cornwell 等<sup>[11]</sup>将该方法从一维梁扩展到二维板的损伤识别中。Shi<sup>[12-14]</sup>通过对1个两层平面钢架的研究证明了将结构单元应变能的变化作为损伤识别

因子的方法是有效的。孙熙平<sup>[15]</sup>首次提出将模态应变能法应用于高桩码头基桩损伤检测中, 通过对高桩码头的一个排架进行研究分析, 对不同工况下基桩的损伤进行了诊断, 得出了模态应变能变化率对损伤单元具有较强的敏感性, 能够识别不同工况下高桩码头基桩的损伤的结论。但是在采用模态应变能法时, 易对损伤较轻的单元和紧邻损伤较为严重的单元造成误判。

### 2.3 模型修正法

由于所建理论模型的结构误差、参数误差、阶次误差<sup>[16-19]</sup>, 需对理论模型进行一定的修正。而模型修正法就是通过一定的条件对直接或间接测得的模态参数、加速度记录、频域函数等进行优化约束, 不断修正模型中的刚度分布, 从而得到基桩构件刚度变化的相关信息, 实现对基桩损伤的检测和判断。张启伟等<sup>[20]</sup>基于有限元模型修正技术, 并利用结构振动测试数据进行桥梁结构的损伤诊断, 取得了较为理想的结果。Kim<sup>[21]</sup>先通过优化模型修正法进行损伤定位, 再用灵敏度法识别损伤, 也取得较好的效果。王乐等<sup>[22]</sup>提出一种基于结构自振频率修正结构刚度矩阵的方法, 该方法只需要获得结构的固有频率, 大大降低了计算量。

测试过程中, 由于模态不完备、自由度不足及噪声较高等原因, 易产生病态方程导致解的不唯一。因此, 采用该法时需处理有限元模型详细分析与相对离散信息之间的不匹配问题。

### 2.4 神经网络法

人工神经网络是对人脑思维方式的某种简化、抽象和模拟。通过结构实验模态分析、理论分析或响应测试, 得到结构在完好和损伤状态下的某几种动态特性或响应, 然后从中提取有效数据作为相应的损伤识别指标, 最后以损伤识别指标作为网络输入, 以与之相对应的目标识别结果为网络输出, 就构成网络训练所需的输入-输出模式, 建立标准数据库, 便可通过对与匹配数据库来识别损伤。1995年, Barai 和 Pandy<sup>[23]</sup>基于神经网络, 根据动荷载作用下的结构的位移响应, 对一刚桁架桥进行了损伤评估。1999年, 王成华和赵志成<sup>[24]</sup>通过在输入层和隐含层间增设一个过渡层改进BP网络模型, 使该模型精度提高。尹娟等<sup>[25]</sup>基于人工神经网络, 利用时域数据对1座5层框架结构进行了损伤评估, 结果表明神经网络对现有

结构进行损伤识别具有较好的适应性。

原始数据库的完整性和算法的可靠性决定了神经网络法的有效性，因此必须保证样本的合理分布和高质量，才能确保人工神经网络对基桩的损伤作出快速准确的判断和识别。

### 3 结论与展望

部分高桩码头结构因承受着多样的荷载以及外部环境的侵蚀而损伤严重，如若不能及时检测和维护，将会影响码头整体的承载性能，严重时甚至会影响码头使用的安全性、稳定性和耐久性。因此对于基桩损伤位置及程度的识别，其重要性不言而喻。目前，传统的高桩码头基桩损伤检测方法大多需将结构破损，且成本高，操作不便，检测结果可靠性较低。而基于动力的基桩损伤检测方法极具发展前景，它无需将结构破损，通过对结构系统施加激励，由结构系统的输入和输出确定结构系统的动力特性，由该动力特性反推出结构系统的质量、刚度变化等信息，该方法的现场工作量小、试验时间短、经济成本较低，最重要的是可以进行实时监测，受到了众多研究者的广泛关注。当然，该方法仍存在许多问题，譬如最优损伤指标的确定、传感器的布置、外界因素干扰的排除等等。因此，高桩码头基桩损伤检测的主要发展趋势分析如下：

1) 使基桩损伤检测走向智能化。由于基桩损伤问题普遍存在，而对基桩的检测和维护又是一个艰辛繁杂的过程，检测人员需到码头下部对基桩进行检测，对于水下基桩甚至需潜入水中，这样做极其消耗人力、物力、财力。因而基桩损伤检测走向智能化的趋势不可避免。

2) 对于极微小损伤的有效检测。对于大型的复杂的工程结构，结构的微小损伤难以检测。如何更有效地检测出结构的微小损伤，仍有待进一步研究。

3) 所检测、识别出的损伤对高桩码头使用寿命的影响判断。目前大多基桩检测手段只能对基桩损伤进行检测定位，而不能对高桩码头的使用寿命进行判别。因此如何通过检测出的损伤对码头使用寿命进行判别和预测，需要进一步研究和解决。

4) 减小误差的影响。譬如提高信号处理器的除噪技术，尽量排除外界因素的干扰，减小误差，提高测试结果的准确性和可靠性。

### 参考文献：

- [1] 柴华友, 刘明贵, 李祺. 应力波在平台-桩系统中传播的实验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 459-464.  
CHAI Hua-you, LIU Ming-gui, LI Qi. Propagation of stress waves in a plate-pile system: experimental studies[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 459-464.
- [2] 季勇志, 王元战, 李珊珊. 码头桩基的纵波检测和扭转波检测的对比研究[J]. 工程勘察, 2010(9): 90-94.  
JI Yong-zhi, WANG Yuan-zhan, LI Shan-shan. Study between longitudinal wave test and torsional wave test of wharf piles [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(9): 90-94.
- [3] CAWLEY P, ADAMS R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979, 14(2): 49-57.
- [4] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [5] HO Y K, EWINS D J. On structural damage identification with mode shapes[C]//Proceedings of COST F3 conference on system identification and structural health monitoring. Madrid. Spain: Kluwer Academic Publishers, 2000: 677-686.
- [6] RAGHAVENDRACHAR M, AKTAN A E. Flexibility by multireference impact testing for bridge diagnostics[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2 186-2 203.
- [7] PANDEY AK, BISWAS M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1): 3-17.
- [8] 杨华. 基于柔度矩阵法的结构损伤识别[J]. 长春理工大学学报, 2005, 28(4): 22-23.  
YANG Hua. Structural damage detection based on flexibility matrix method[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2005, 28(4): 22-23.
- [9] CHEN J C, GARBA J A. On-orbit damage assessment for large space structures[J]. AIAA Journal, 1988, 26 (9): 1 119-1 126.
- [10] STUBBS N, KIM J T. Damage localization in structures without baseline modal parameters[J]. AIAA Journal, 1996, 34(8): 1 644-1 649.
- [11] CORNWELL P, DOEBLING S W, FARRAR C R. Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 224(2): 359-374.
- [12] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Structural damage localization from modal strain energy change[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 218(5): 825-844.
- [13] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Structural damage detection from modal strain energy change[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1216-1223.
- [14] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Improved damage quantification from elemental modal strain energy change[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5): 521-529.
- [15] 孙熙平. 基于动力特性的高桩码头基桩损伤识别方法及承载  
(下转第 56 页)